(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
28. Juni 2018 (28.06.2018)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/115123 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G02F 1/01 (2006.01) *G02F 1/21* (2006.01)
G02F 1/225 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/083819

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. Dezember 2017 (20.12.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 225 682.3
20. Dezember 2016 (20.12.2016) DE
10 2017 200 764.8
18. Januar 2017 (18.01.2017) DE

(71) Anmelder: **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.** [DE/DE]; Hansastraße 27c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder: **AIMONE, Alessandro**; Kottbusserstraße 24, 10999 Berlin (IT). **FRACZEK, Tomasz**; Lotos Ave. 33102, Yucaipa CA, USA, California 92399 (US).

(74) Anwalt: **MAIKOWSKI & NINNEMANN PATENTANWÄLTE PARTNERSCHAFT MBB**; Kurfürstendamm 54-55, 10707 Berlin (DE).

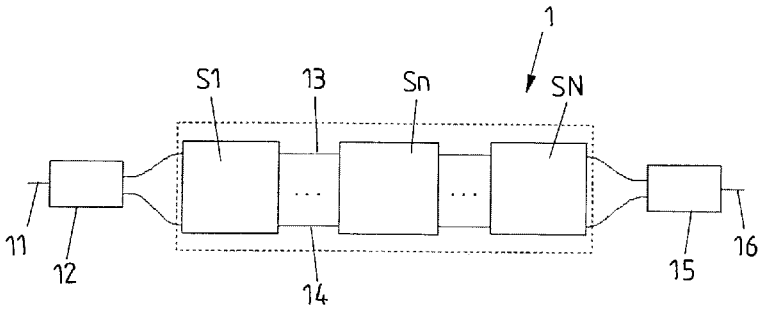
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,

WO 2018/115123 A1

(54) Title: MACH-ZEHNDER MODULATOR AND METHOD FOR OPERATING A MACH-ZEHNDER MODULATOR

(54) Bezeichnung: MACH-ZEHNDER-MODULATOR UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES MACH-ZEHNDER-MODULATORS

FIG 2



(57) Abstract: The invention relates to an electrooptical Mach-Zehnder modulator, comprising a first and a second waveguide arm (13, 14). Each of the first and the second waveguide arm (13, 14) is designed to guide at least one first and one second optical mode (M1, M2), and the modulator (1) is designed to modify the phase of a first optical mode (M1) which propagates in the first and/or second waveguide arm (13, 14) depending on a first modulation signal and the phase of a second optical mode (M2) which propagates in the first and/or second waveguide arm (13, 14) depending on a second modulation signal. The Mach-Zehnder modulator is designed to generate a starting signal from the two modulated modes (M1, M2), said starting signal being used to provide a first and a second optical data signal. The invention also relates to a method for operating a Mach-Zehnder modulator.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen elektro-optischer Mach-Zehnder-Modulator, mit einem ersten und zweiten Wellenleiterarm (13, 14), wobei der erste und der zweite Wellenleiterarm (13, 14) jeweils zur Führung mindestens einer ersten und einer zweiten optischen Mode (M1, M2) ausgebildet ist, und wobei der Modulator (1) ausgebildet ist, die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden ersten optischen Mode (M1) abhängig von einem ersten Modulationssignal und die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden zweiten optischen Mode (M2) abhängig von einem zweiten Modulationssignal zu verändern wobei der Mach-Zehnder-Modulator ausgebildet ist, aus den beiden modulierten Moden (M1, M2) ein Ausgangssignal zu erzeugen, mit dem ein erstes und ein zweites optisches Datensignal bereitgestellt wird. Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Betreiben eines Mach-Zehnder-Modulators.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Mach-Zehnder-Modulator und Verfahren zum Betreiben eines Mach-Zehnder-Modulators

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen elektro-optischen Mach-Zehnder-Modulator gemäß Anspruch 1 sowie ein Verfahren zum Betreiben eines Mach-Zehnder-Modulators gemäß Anspruch 17.

Mach-Zehnder-Modulatoren werden insbesondere als Bestandteil eines optischen Senders in einem optischen Datenübertragungssystem eingesetzt. Zur Erhöhung der spektralen Effizienz der Datenübertragung werden zum Beispiel Multilevel-Modulationsformate verwendet; zum Beispiel die Puls-Amplituden-Modulation (PAM) oder die Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM). Derartige Modulationsformate erhöhen jedoch die Komplexität auf Sender- und Empfängerseite. Insbesondere ist die Verwendung mehrerer Sender- und Empfänger erforderlich.

Das der Erfindung zugrunde liegende Problem besteht darin, auf möglichst einfache Weise die spektrale Effizienz zu erhöhen.

Dieses Problem wird durch die Bereitstellung des Mach-Zehnder-Modulators mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch das Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 17 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Danach wird ein elektro-optischer Mach-Zehnder-Modulator bereitgestellt, mit

- einem ersten und zweiten Wellenleiterarm, wobei
- der erste und der zweite Wellenleiterarm jeweils zur Führung mindestens einer ersten und einer zweiten optischen Mode ausgebildet ist, und wobei
- der Modulator ausgebildet ist, die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden ersten optischen Mode abhängig von einem ersten (elektrischen) Modulationssignal und die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden zweiten optischen Mode (die von der ersten Mode verschieden ist) abhängig von einem zweiten (elektrischen) Modulationssignal zu verändern, wobei
- der Mach-Zehnder-Modulator ausgebildet ist, aus den beiden modulierten Moden ein Ausgangssignal zu erzeugen, mit dem ein (von dem ersten bzw. zweiten Modulationssignal abhängiges) erstes und ein zweites optisches Datensignal bereitgestellt wird.

Das Ausgangssignal des erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulators enthält somit eine erste, gemäß dem ersten Modulationssignal modulierte Mode und eine zweite gemäß dem zweiten Modulationssignal modulierte Mode. Aus diesen beiden (insbesondere unterschiedlich) modulierten Moden des Ausgangssignals lässt sich ein erstes (dem ersten Modulationssignal entsprechendes) und ein zweites (dem zweiten Modulationssignal entsprechendes) optisches Datensignal gewinnen, wobei die beiden optischen Datensignale insbesondere unterschiedlich sind. Bei dem ersten Modulationssignal handelt es sich insbesondere um ein erstes (elektrisches) Datensignal und bei dem zweiten Modulationssignal um ein zweites (elektrisches) Datensignal, wobei sich das erste Datensignal beispielsweise von dem zweiten Datensignal unterscheidet.

Mit einem einzigen erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulator können demnach parallel mindestens zwei voneinander unabhängige optische Datensignale erzeugt werden, so dass sich die spektrale Effizienz der Datenübertragung zumindest um den Faktor 2 erhöht. Somit erfolgt eine Erhöhung der spektralen Effizienz ohne aufwendigere Elektronik oder Erhöhung der optischen Bandbreite. Zudem ist der erfindungsgemäße Modulator mit komplexen Modulationsformaten und Polarisationsmultiplexing-Verfahren kompatibel.

Beispielsweise erfolgt die Veränderung der Phase der ersten Mode zumindest im Wesentlichen unabhängig von dem zweiten Modulationssignal und umgekehrt die Veränderung der Phase der zweiten Mode unabhängig von dem ersten Modulationssignal. Denkbar ist, dass lediglich die Phase der sich in einem der beiden Wellenleiterarme ausbreitenden Mode verändert wird, während die Phase der entsprechenden Mode in dem anderen Wellenleiterarm unverändert bleibt. So könnte z.B. die Phase der ersten Mode in dem ersten Wellenleiterarm abhängig von dem ersten Modulationssignal verändert werden, während die Phase der ersten Mode in dem zweiten Wellenleiterarm unverändert bleibt. Möglich ist allerdings auch, dass sowohl die Phase der sich in dem ersten Wellenleiterarm ausbreitenden Mode, als auch die Phase der entsprechenden sich in dem zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden Mode verändert wird. So könnte z.B. eine Phasenverschiebung der sich in dem ersten Wellenleiterarm ausbreitenden ersten Mode und zudem eine (z.B. entgegengesetzte) Phasenverschiebung der sich in dem zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden ersten Mode erzeugt werden (analog für die zweite Mode).

Darüber hinaus können in dem ersten und dem zweiten Wellenleiterarm jeweils mehr als zwei optische Moden geführt werden, wobei der Modulator ausgebildet ist, mehr als zwei optische Moden in Abhängigkeit von mehr als zwei Modulationssignalen zu modulieren, um die spektrale Effizienz weiter zu steigern. Beispielsweise sind die Wellenleiterarme als „Few-mode"-Wellenleiter ausgebildet, d.h. als Wellenleiter, in dem eine begrenzte Anzahl von Moden (z.B. weniger als 20 oder 10 Moden) ausbreitungsfähig ist. Entsprechend kann es sich bei dem erfindungsgemäßen Modulator um einen „Few-mode"-Modulator handeln.

Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung umfasst der Modulator eine Elektrodenanordnung, über die in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm mindestens ein von dem ersten Modulationssignal abhängiges erstes elektrisches Feld und ein von dem zweiten Modulationssignal abhängiges zweites elektrisches Feld erzeugbar ist. Mittels des ersten und zweiten elektrischen Felds wird die Phasenveränderung in Bezug auf die erste und zweite Mode erzeugt. Möglich ist, dass das erste oder zweite elektrische Feld jeweils nur in einem der Wellenleiterarme erzeugt wird. Allerdings kann das erste elektrische Feld (analog das zweite elektrische Feld) durchaus sowohl in dem ersten Wellenleiterarm als auch in dem zweiten Wellenleiterarm bestehen, d.h. einen Feldanteil aufweisen, der in dem ersten Wellenleiterarm lokalisiert ist,

und einen weiteren Feldanteil, der den zweiten Wellenleiterarm durchsetzt. Beispielsweise erzeugen die beiden Feldanteile entgegengesetzte Phasenverschiebungen.

Insbesondere ist die Effizienz einer zur Erzeugung des ersten elektrischen Feldes an die Elektrodenanordnung angelegten ersten Spannung in Bezug auf die erste Mode größer als in Bezug auf die zweite Mode, und die Effizienz einer zur Erzeugung des zweiten elektrischen Feldes an die Elektrodenanordnung angelegten zweiten Spannung in Bezug auf die zweite Mode ist größer als in Bezug auf die erste Mode. Beispielsweise wird unter der Effizienz die erzeugte Phasenverschiebung der jeweiligen Mode bezogen auf die angelegte Spannung oder die Modulationseffizienz, d.h. die am Modulatorausgang hervorgerufene Auslöschung der jeweiligen Mode bezogen auf die angelegte Spannung verstanden.

So wird z.B. mit dem ersten elektrischen Feld eine Änderung der Phase der ersten Mode erzeugt, die größer ist als eine durch das erste elektrische Feld erzeugte Änderung der Phase der zweiten Mode, und mit dem zweiten elektrischen Feld wird eine Änderung der Phase der zweiten Mode erzeugt, die größer ist als eine durch das zweite elektrische Feld erzeugte Änderung der Phase der ersten Mode.

Denkbar ist z.B., dass die Effizienz (insbesondere die hervorgerufene Phasenänderung) der ersten elektrischen Spannung in Bezug auf die erste Mode mindestens das 1,5-Fache, mindestens das Zweifache, mindestens das Fünffache oder mindestens das Zehnfache der Effizienz in Bezug auf die zweite Mode beträgt. Analog kann die Effizienz der zweiten elektrischen Spannung in Bezug auf die zweite Mode ebenfalls mindestens das 1,5-Fache, mindestens das Zweifache, mindestens das Fünffache oder mindestens das Zehnfache seiner Effizienz in Bezug auf die erste Mode betragen. Denkbar ist natürlich durchaus auch, dass die Effizienzunterschiede der Spannungen bezüglich der beiden Moden geringer ausfallen.

Möglich ist auch, dass mit dem ersten elektrischen Feld die Phase der ersten Mode, zumindest Wesentlichen jedoch nicht die Phase der zweiten Mode, und mit dem zweiten elektrischen Feld die Phase der zweiten Mode, zumindest im Wesentlichen jedoch nicht die Phase der ersten Mode verändert wird.

Gemäß einer anderen Weiterbildung des erfindungsgemäßen Modulators umfasst die Elektrodenanordnung eine Mehrzahl von Elektroden, wobei auf dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm jeweils mindestens eine erste und eine zweite Elektrode angeordnet sind; insbesondere nebeneinander (quer zur Richtung der Wellenleiterarme betrachtet). Mit Hilfe der ersten und der zweiten Elektrode lässt sich das oben erwähnte erste und zweite elektrische Feld erzeugen. Denkbar ist hierbei, dass die erste und die zweite Elektrode zum Erzeugen des ersten elektrischen Feldes mit einer ersten Beschaltung (d.h. unter Anlegen von ersten Potentialen) und zum Erzeugen des zweiten elektrischen Feldes mit einer zweiten Beschaltung (d.h. unter Anlegen von zweiten Potentialen, die von den ersten Potentialen verschieden) betrieben werden.

Darüber hinaus kann der erfindungsgemäße Modulator Isolierungsmittel aufweisen, die einem Kurzschluss zwischen der ersten und der zweiten Elektrode entgegenwirken oder einen solchen Kurzschluss verhindern. Beispielsweise umfassen die Isolierungsmittel eine (zum Beispiel schlitzförmige) Ausnehmung zwischen der ersten und der zweiten Elektrode in dem jeweiligen Wellenleiterarm. Insbesondere befindet sich die Ausnehmung in einer elektrisch leitfähigen Schicht, auf der die Elektroden angeordnet sind. Denkbar ist auch, dass alternativ oder zusätzlich zu der Ausnehmung mindestens eine elektrisch isolierende Schicht, die z.B. zu einer lichtführenden Struktur des Modulators gehört, vorhanden ist, die sich zwischen der ersten und/oder zweiten Elektrode und dem jeweiligen Wellenleiterarm erstreckt. Beispielsweise erstreckt sich die Ausnehmung in einer elektrisch leitfähigen Schicht, die auf der isolierenden Schicht angeordnet ist. Denkbar ist hierbei, dass die Ausnehmung bis zu der isolierenden Schicht oder sogar in die isolierende Schicht hinein verläuft.

Gemäß einer anderen Weiterbildung umfasst der erfindungsgemäße Modulator eine erste Sektion, die zur Veränderung der Phase der ersten Mode in Abhängigkeit von dem ersten Modulationssignal, und eine zweiten Sektion, die zur Veränderung der Phase der zweiten Mode in Abhängigkeit von dem zweiten Modulationssignal ausgebildet ist.

Beispielsweise ist die erste Sektion dem ersten Wellenleiterarm und die zweiten Sektion dem zweiten Wellenleiterarm zugeordnet. So kann die erste Sektion Elektroden zum Erzeugen des oben erwähnten ersten elektrischen Feldes und die zweite Sektion Elektroden zur Erzeugung des zweiten elektrischen Feldes aufweisen. Alternativ oder zusätzlich kann die erste Sektion eine erste Geometrie des Wellenleiterarms (die ein Einwirken des ersten elektrischen Feldes

auf die erste Mode begünstigt) und die zweite Sektion eine davon abweichende, zweite Geometrie des Wellenleiterarms (die ein Einwirken des zweiten elektrischen Feldes auf die zweite Mode begünstigt) umfassen. Denkbar ist allerdings auch, dass die Sektionen dieselbe Wellenleitergeometrie besitzen.

Denkbar ist auch, dass sowohl die erste als auch die zweite Sektion demselben Wellenleiterarm zugeordnet sind. Beispielsweise sind die beiden Sektionen entlang des Wellenleiterarms hintereinander angeordnet.

Möglich ist zudem, dass die erste und die zweite Sektion jeweils sowohl dem ersten und dem zweiten Wellenleiterarm zugeordnet sind. Die erste Sektion wirkt hier sowohl auf die erste Mode in dem ersten Wellenleiterarm als auch auf die erste Mode in dem zweiten Wellenleiterarm, während die zweite Sektion analog auf die zweite Mode in dem ersten Wellenleiterarm und die zweite Mode in dem zweiten Wellenleiterarm wirkt.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Betreiben eines Mach-Zehnder-Modulators, der einen ersten und einen zweiten Wellenleiterarm zur Führung mindestens einer ersten und einer zweiten optischen Mode aufweist und insbesondere wie vorstehend beschrieben ausgebildet ist, mit den Schritten:

- Verändern der Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden ersten optischen Mode abhängig von einem ersten Modulationssignal;
- Verändern der Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm ausbreitenden zweiten optischen Mode abhängig von einem zweiten Modulationssignal; und
- Erzeugen eines Ausgangssignals aus den beiden modulierten Moden, mit dem ein erstes und ein zweites optisches Datensignal bereitgestellt wird.

Selbstverständlich können die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulator beschriebenen Ausführungsbeispiele analog auch zur Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden. So wird beispielsweise in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm mindestens ein von dem ersten Modulationssignal abhängiges erstes elektrisches Feld und/oder ein von dem zweiten Modulationssignal abhängiges zweites elektrisches Feld erzeugt. Das Erzeugen des ersten und des zweiten elektrischen Feldes erfolgt insbesondere zumindest näherungsweise gleichzeitig.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 schematisch den Aufbau eines Mach-Zehnder-Modulators gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Figur 2 schematisch den Aufbau eines Mach-Zehnder-Modulators gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Figur 3 einen Schnitt durch eine Sektion eines erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulators, die zur Beeinflussung einer ersten Mode ausgebildet ist;

Figur 4 eine Sektion eines erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulators zur Beeinflussung einer zweiten Mode;

Figur 5 eine Abwandlung der Fig. 3;

Figur 6 eine alternative Beschaltung der Elektrodenanordnung aus Figur 5;

Figur 7 eine weitere alternative Beschaltung der Elektrodenanordnung aus Fig. 5; und

Figur 8 eine Abwandlung der Figuren 5 bis 7.

Der in Figur 1 dargestellte erfindungsgemäße Mach-Zehnder-Modulator 1 weist einen Einkoppelwellenleiter 11 und einen Eingangsteiler 12 („Splitter“) auf. Der Eingangsteiler 12 teilt über den Einkoppelwellenleiter 11 in den Modulator 1 eingekoppeltes Licht (z.B. eines nicht dargestellten Lasers) in zwei Pfade auf, die durch zwei Wellenleiterarme 13, 14 gebildet sind. Die Wellenleiterarme 13, 14 sind in einem Kombinierer 15 zusammengeführt, der über einen Ausgangswellenleiter 16 ein Ausgangssignal des Modulators 1 auskoppelt. Bei dem Mach-Zehnder-Modulator 1 handelt es sich insbesondere um ein integriert-optisches Bauelement; z.B. um ein Halbleiter-Bauelement (etwa ein InP- oder GaAs-Bauelement). Entsprechend sind die

Bestandteile des Modulators 1 (z.B. die beiden Wellenleiterarme 13, 14) durch integriert-optische Komponenten ausgebildet.

Die beiden Wellenleiterarme 13, 14 sind jeweils als mehrmodige Wellenleiter ausgelegt, d.h. sowohl der erste Wellenleiterarm 13, als auch der zweite Wellenleiterarm 14 sind zur Führung mehrerer räumlicher optischer Moden ausgebildet.

Des Weiteren umfasst der erste Wellenleiterarm 13 eine erste Sektion S1, die zur Veränderung der Phase einer in dem Wellenleiterarm 13 geführten ersten optischen Mode in Abhängigkeit von einem ersten (insbesondere hochfrequenten) Modulationssignal (Modulationsspannung) ausgebildet ist. Der zweite Wellenleiterarm 14 umfasst hingegen eine zweite Sektion S2, die zur Veränderung der Phase einer zweiten (von der ersten Mode verschiedenen) Mode in Abhängigkeit von einem zweiten (insbesondere ebenfalls hochfrequenten) Modulationssignal ausgebildet ist. Die erste Sektion S1 erzeugt eine Änderung der Phase der ersten Mode, die größer ist als eine Änderung der Phase der zweiten Mode, während die zweite Sektion S2 eine Änderung der Phase der zweiten Mode hervorruft, die größer ist als eine Änderung der Phase der ersten Mode. Insbesondere wirkt die erste Sektion S1 zumindest im Wesentlichen nur auf die erste Mode, während die zweite Sektion S2 zumindest im Wesentlichen nur auf die zweite Mode wirkt.

Beispielsweise unterscheiden sich die Sektionen S1, S2 hinsichtlich der Geometrie der Wellenleiterarme und/oder durch die Konfiguration von Elektroden zur Erzeugung eines elektrischen Feldes in den Wellenleiterarmen. So weist der erste Wellenleiterarm 13 z.B. in der ersten Sektion S1 einen Wellenleiterquerschnitt gemäß Figur 3 oder Figur 5 auf. Analog kann auch der zweiten Wellenleiterarm 14 in der zweiten Sektion S2 einen derartigen Querschnitt besitzen. Allerdings unterscheiden sich die erste und die zweite Sektion S1, S2 zumindest darin, dass unterschiedliche elektrische Felder zur Beeinflussung der in den Wellenleiterarm 13, 14 geführten Moden erzeugt werden.

So wird insbesondere in der ersten Sektion S1 ein elektrisches Feld erzeugt, das mit höherer Effizienz auf die erste Mode wirkt als auf die zweite Mode, während in der zweiten Sektion S2 ein elektrisches Feld erzeugt wird, das umgekehrt mit höherer Effizienz auf die zweite Mode wirkt als auf die erste Mode. Somit lässt sich mit dem Modulator 1 der Figur 1 ein Ausgangs-

signal erzeugen, das zwei (gemäß dem ersten bzw. zweiten Modulationssignal) unterschiedlich modulierte Moden aufweist. Somit stellt der Modulator 1 gleichzeitig zwei unterschiedliche optische Datenströme bereit.

Eine alternative Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Modulators ist in Figur 2 dargestellt. Danach umfasst der Modulator mehrere (N) Sektionen S1 bis SN, die entlang der Wellenleiterarme 13, 14 hintereinander angeordnet sind.

Die Sektionen S1 bis SN sind jeweils zur Veränderung der Phase einer von N in den Wellenleiterarmen 13, 14 geführten optischen Moden ausgebildet. So dient zum Beispiel die erste Sektion S1 zur Veränderung der Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm 13, 14 ausbreitenden ersten Mode in Abhängigkeit von einem ersten Modulationssignal, die Sektion Sn zur Veränderung der Phase einer n-ten Mode in Abhängigkeit von einem n-ten Modulationssignal und die Sektion SN zur Veränderung der Phase einer N-ten Mode abhängig von einem N-ten Modulationssignal.

Die Sektionen S1 bis SN unterscheiden sich insbesondere darin, dass sie jeweils ein elektrisches Feld in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm 13, 14 erzeugen, das mit höherer Effizienz auf die jeweilige Mode wirkt als auf die anderen Moden. So erfolgt in der ersten Sektion zum Beispiel im Wesentlichen nur eine Veränderung der Phase der ersten Mode in Anhängigkeit von dem ersten Modulationssignal. Entsprechend kann der Modulator 1 ein Ausgangssignal mit N unterschiedlich modulierten Moden und damit parallel N unterschiedliche optische Datenströme bereitstellen.

Eine bereits oben angesprochene denkbare Ausgestaltung der Sektionen S1 oder S2 der Wellenleiterarme 13, 14 der Fig. 1 oder zumindest einiger der Sektionen S1 bis SN der Fig. 2 ist in Figur 3 dargestellt. Danach ist der Wellenleiterarm 13, 14 als Rippenwellenleiter ausgebildet, der einen (auf einem Substrat angeordneten) Sockel 131 und eine Rippe 132 umfasst. Auf einem Abschnitt der Rippe 132 befindet sich eine erste und zweite Elektrode 21, 22, über die in dem Wellenleiterarm 13, 14 ein elektrisches Feld E erzeugbar ist. Beispielsweise werden die Elektroden 21, 22 so gestaltet, dass sie jeweils ein höheres Potential (mit „+“ gekennzeichnet) gegenüber Masse aufweisen. Das an den Elektroden 21, 22 anliegenden Potentiale hängen jeweils von dem ersten Modulationssignal (Modulationsspannung) ab oder werden direkt

von dem ersten Modulationssignal erzeugt, müssen allerdings nicht identisch sein. Bei Kopplung des Sockels 131 oder des Substrats mit Masse ergibt sich in dem Wellenleiterarm 13, 14 das in Figur 3 durch Pfeile angedeutete elektrische Feld E.

Die Elektroden 21, 22 sind quer zur Richtung des Wellenleiterarms nebeneinander angeordnet und durch Isolierungsmittel in Form einer (insbesondere geätzten) Aussparung 3 in einer Oberseite der Rippe 132, die sich zwischen ihnen befindet, elektrisch voneinander getrennt. Die Elektroden 21, 22 sind so platziert und beschaltet, dass das erzeugte elektrische Feld E mit größerer Effizienz auf eine in dem Wellenleiterarm 13, 14 geführte optische Grundmode M1 wirkt als auf höhere Moden. Entsprechend wird mit der in Figur 3 gezeigten Beschaltung der Elektroden 21, 22 im Wesentlichen die Phase der Grundmode M1 moduliert. Denkbar ist wir bereits erwähnt, dass sowohl der erste als auch der zweite Wellenleiterarm 13, 14 mit Elektroden 21, 22 versehen ist, wobei etwa die Elektroden des einen Wellenleiterarms gemäß Fig. 3 beschaltet sind und die Elektroden des anderen Wellenleiterarms mit einem Potential beaufschlagt werden, das ein umgekehrtes (hier negatives) Vorzeichen besitzt, so dass ein entgegengesetztes elektrisches Feld und damit eine entgegengesetzte Phasenverschiebung erzeugt wird. Die entgegengesetzten Phasenverschiebungen addieren sich dann bei Zusammenführen der beiden ersten Moden in dem Kombinierer 15.

Zur Veränderung der Phase der zweiten Mode weist beispielsweise die andere der Sektionen S1 oder S2 bzw. eine der anderen der Sektionen S1 bis SN zwar eine zur Fig. 3 identische Elektrodenanordnung auf (mit Elektroden 21, 22). Die Elektroden 21, 22 sind jedoch anders beschaltet, wie dies in Fig. 4 dargestellt ist. Demnach liegt an der linken Elektrode 21 ein positives und an der rechten Elektrode 22 ein negatives Potential an, wodurch in dem Wellenleiterarm 13, 14 ein elektrisches Feld E' mit unterschiedlich gerichteten Feldkomponenten erzeugt wird. Dieses Feld verläuft so, dass es auf andere Weise (insbesondere mit größerer Effizienz) auf eine zweite Mode M2 wirkt als auf die ersten Mode M1, deren räumliche Position und Ausdehnung sich von der ersten Mode M2 unterscheidet. Die an den Elektroden 21, 22 anliegenden Potentiale hängen von dem zweiten Modulationssignal ab oder werden direkt von dem zweiten Modulationssignal erzeugt.

Denkbar sind natürlich Abwandlungen der in den Figuren 3 und 4 gezeigten Konfiguration der Wellenleiterarme und der Elektroden zur Beeinflussung verschiedener optischer Moden. Eine mögliche Abwandlung der Figuren 3 und 4 ist in der Figur 5 gezeigt. Danach weist der erste

und/oder der zweite Wellenleiterarm 13 und 14 Sektionen mit drei Elektroden 21-23 auf, die jeweils durch eine Ausnehmung 31, 32 in einer Oberseite des Wellenleiterarms 13, 14 (der Rippe 132) elektrisch voneinander getrennt sind.

Durch unterschiedliche Beschaltung der Elektroden 21-23 werden verschiedene elektrische Felder E, E', E'' erzeugt, die jeweils auf unterschiedliche optische Moden in dem Wellenleiterarm wirken. Denkbar ist zum Beispiel die in Figur 5 gezeigte Beschaltung, wonach die Elektroden 21-23 gegenüber Masse jeweils ein positives Potential aufweisen (analog zur Fig. 1 mit „+“ gekennzeichnet). Diese Variante kann z.B. zur Beeinflussung und damit Modulation insbesondere der ersten Mode (Grundmode) in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm 13, 14 verwendet werden. Andere Moden lassen sich insbesondere zum Beispiel dadurch beeinflussen und somit modulieren, dass eine der Elektroden 21-23 ein gegenüber Masse negatives Potential aufweist; zum Beispiel eine der äußeren Elektroden 21, 23 (Figur 6) oder die mittlere Elektrode 22 (Figur 7).

Denkbar ist auch, dass anstelle der isolierenden Ausnehmungen 31, 32 eine elektrisch isolierende Schicht 4 vorgesehen ist, die sich zwischen einer Oberseite der Wellenleiterrippe 132 und den Elektroden 21-23 erstreckt. Dies ist in Figur 8 gezeigt.

Es wird darauf hingewiesen, dass Elemente der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele natürlich auch in Kombination miteinander verwendet werden können. Beispielsweise kann zusätzlich oder alternativ zu der Aussparung 3 der Fig. 3 und 4 auch eine Isolationsschicht gemäß Fig. 8 vorgesehen sein.

* * * * *

Patentansprüche

1. Elektro-optischer Mach-Zehnder-Modulator, mit
   - einem ersten und zweiten Wellenleiterarm (13, 14), wobei
   - der erste und der zweite Wellenleiterarm (13, 14) jeweils zur Führung mindestens einer ersten und einer zweiten optischen Mode (M1, M2) ausgebildet ist, und
   - der Modulator (1) ausgebildet ist, die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden ersten optischen Mode (M1) abhängig von einem ersten Modulationssignal und die Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden zweiten optischen Mode (M2) abhängig von einem zweiten Modulationssignal zu verändern, wobei
   - der Mach-Zehnder-Modulator ausgebildet ist, aus den beiden modulierten Moden (M1, M2) ein Ausgangssignal zu erzeugen, mit dem ein erstes und ein zweites optisches Datensignal bereitgestellt wird.

2. Modulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich bei dem ersten Modulationssignal um ein erstes Datensignal und bei dem zweiten Modulationssignal um ein zweites Datensignal handelt.

3. Modulator nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich das erste Modulationssignal von dem zweiten Modulationssignal unterscheidet.

4. Modulator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich das erste von dem zweiten optischen Datensignal unterscheidet.

5. Modulator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wellenleiterarme (13, 14) jeweils zur Führung von mehr als zwei optischen Moden ausgebildet sind.

6. Modulator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Elektrodenanordnung, über die in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) mindestens ein von dem ersten Modulationssignal abhängiges erstes elektrisches Feld (E) und/oder ein von dem zweiten Modulationssignal abhängiges zweites elektrisches Feld (E´) erzeugbar ist.

7. Modulator nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine zur Erzeugung des ersten elektrischen Feldes (E) an die Elektrodenanordnung angelegte erste Spannung mit größerer Effizienz auf die erste Mode (M1) wirkt als auf die zweite Mode (M2) und das eine zur Erzeugung des zweiten elektrische Feldes (E´) an die Elektrodenanordnung angelegte zweite Spannung mit größerer Effizienz auf die zweite Mode (M2) wirkt als auf die erste Mode (M1).

8. Modulator nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem ersten elektrischen Feld (E) eine Änderung der Phase der ersten Mode (M1) erzeugt wird, die größer ist als eine durch das erste elektrische Feld (E) erzeugte Änderung der Phase der zweiten Mode (M2), und mit dem zweiten elektrischen Feld (E´) eine Änderung der Phase der zweiten Mode (M2) erzeugt wird, die größer ist als eine durch das zweite elektrische Feld (E´) erzeugte Änderung der Phase der ersten Mode (M1).

9. Modulator nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem ersten elektrischen Feld (E) die Phase der ersten Mode (M1), zumindest im Wesentlichen jedoch nicht die Phase der zweiten Mode (M2), und mit dem zweiten elektrischen Feld (E´) die Phase der zweiten Mode (M2), zumindest im Wesentlichen jedoch nicht die Phase der ersten Mode (M1) verändert wird.

10. Modulator nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Elektrodenanordnung eine Mehrzahl von Elektroden (21, 22, 23) umfasst, wobei auf dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) jeweils mindestens eine erste und eine zweite Elektrode (21, 22) angeordnet ist.

11. Modulator nach Anspruch 10, **gekennzeichnet durch** Isolierungsmittel, die einem Kurzschluss zwischen der ersten und der zweiten Elektrode (21, 22) entgegenwirken.

12. Modulator nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Isolierungsmittel eine Ausnehmung (3) zwischen der ersten und der zweiten Elektrode (21, 22) in dem jeweiligen Wellenleiterarm (13, 14) aufweisen.

13. Modulator nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Isolierungsmittel mindestens eine elektrisch isolierende Schicht (4) umfassen, die sich zwischen der

ersten und/oder zweiten Elektrode (21, 22) und dem jeweiligen Wellenleiterarm (13, 14) erstreckt.

14. Modulator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** mindestens eine erste Sektion (S1), die zur Veränderung der Phase der ersten Mode (M1) in Abhängigkeit von dem ersten Modulationssignal ausgebildet ist, und eine zweite Sektion (S2), die zur Veränderung der Phase der zweiten Mode (M2) in Abhängigkeit von dem zweiten Modulationssignal ausgebildet ist.

15. Modulator nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Sektion (S1) dem ersten Wellenleiterarm (13) und die zweite Sektion (S2) dem zweiten Wellenleiterarm (14) zugeordnet ist.

16. Modulator nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste und die zweite Sektion (S1, S2) demselben Wellenleiterarm (13, 14) zugeordnet sind.

17. Modulator nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sektionen (S1, S2) entlang des Wellenleiterarms (13, 14) hintereinander angeordnet sind.

18. Modulator nach einem der Ansprüche 14 bis 17 soweit rückbezogen auf Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Sektion (S1) mindestens eine Elektrode zum Erzeugen des ersten elektrischen Felds (E) und die zweite Sektion (S2) mindestens eine Elektrode zum Erzeugen des zweiten elektrischen Felds (E´) aufweist.

19. Verfahren zum Betreiben eines Mach-Zehnder-Modulators (1), der einen ersten und einen zweiten Wellenleiterarm (13, 14) jeweils zur Führung mindestens einer ersten und einer zweiten optischen Mode (M1, M2) aufweist und insbesondere gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist, mit den Schritten:

- Verändern der Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden ersten optischen Mode (M1) abhängig von einem ersten Modulationssignal;
- Verändern der Phase einer sich in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) ausbreitenden zweiten optischen Mode (M2) abhängig von einem zweiten Modulationssignal; und

- Erzeugen eines Ausgangssignals aus den beiden modulierten Moden (M1, M2), mit dem ein erstes und ein zweites optisches Datensignal bereitgestellt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass in dem ersten und/oder zweiten Wellenleiterarm (13, 14) mindestens ein von dem ersten Modulationssignal abhängiges erstes elektrisches Feld (E) und/oder ein von dem zweiten Modulationssignal abhängiges zweites elektrisches Feld (E´) erzeugt wird.

FIG 1

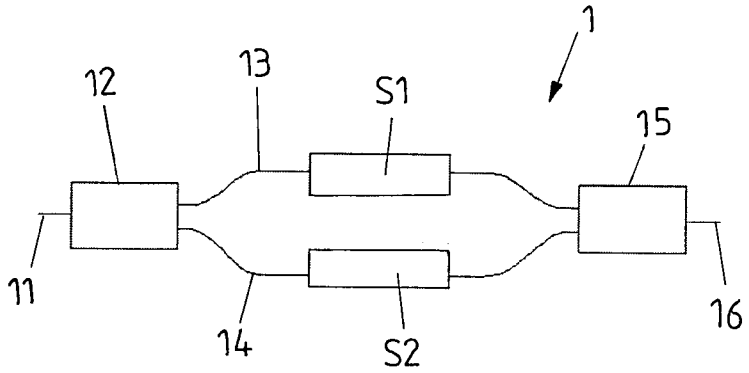


FIG 2

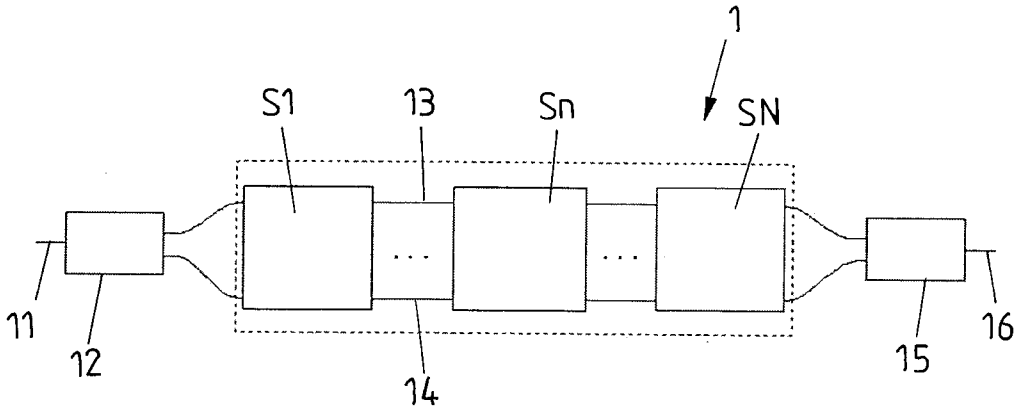


FIG 3

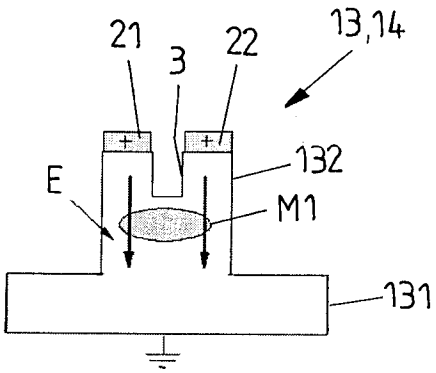


FIG 4

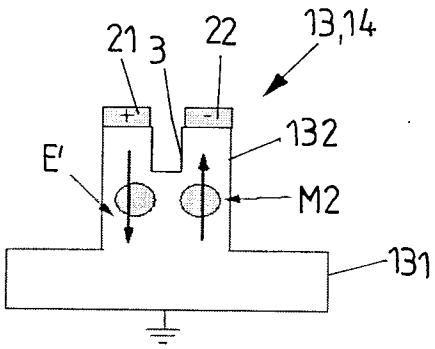


FIG 5

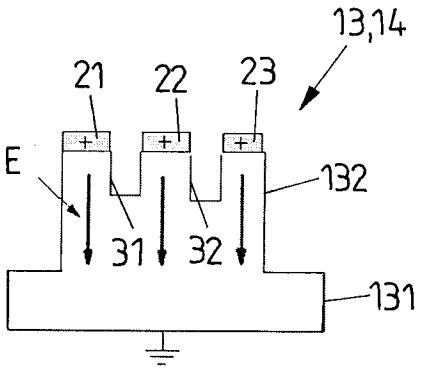


FIG 6

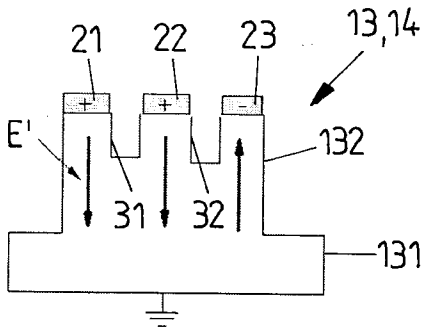


FIG 7

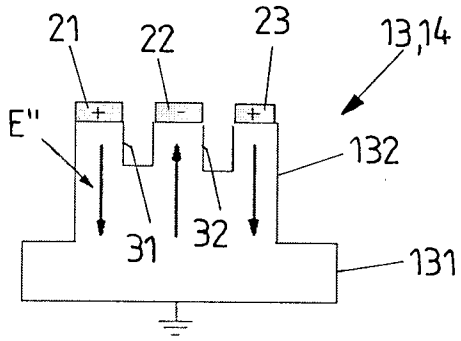
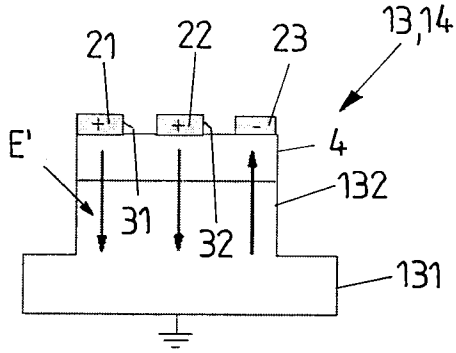


FIG 8



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/083819

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G02F1/01 G02F1/225
ADD. G02F1/21

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G02F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2014/321792 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 30 October 2014 (2014-10-30) paragraphs [0024] - [0027]; figures 1,2	1-20
X	US 2014/334765 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 13 November 2014 (2014-11-13) figures 1,2	1,19
X	US 2014/169722 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 19 June 2014 (2014-06-19) figures 1,2	1,19

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
9 March 2018	16/03/2018

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Aichmayr, Günther

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2017/083819

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2014321792 A1	30-10-2014	TW 201441725 A	01-11-2014
		US 2014321792 A1	30-10-2014
US 2014334765 A1	13-11-2014	TW 201443514 A	16-11-2014
		US 2014334765 A1	13-11-2014
US 2014169722 A1	19-06-2014	TW 201426151 A	01-07-2014
		US 2014169722 A1	19-06-2014

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/083819

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G02F1/01 G02F1/225
ADD. G02F1/21

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G02F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2014/321792 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 30. Oktober 2014 (2014-10-30) Absätze [0024] - [0027]; Abbildungen 1,2	1-20
X	US 2014/334765 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 13. November 2014 (2014-11-13) Abbildungen 1,2	1,19
X	US 2014/169722 A1 (HUANG HSIN-SHUN [TW]) 19. Juni 2014 (2014-06-19) Abbildungen 1,2	1,19

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
9. März 2018	16/03/2018

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Aichmayr, Günther

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/083819

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2014321792 A1	30-10-2014	TW 201441725 A	01-11-2014
		US 2014321792 A1	30-10-2014
US 2014334765 A1	13-11-2014	TW 201443514 A	16-11-2014
		US 2014334765 A1	13-11-2014
US 2014169722 A1	19-06-2014	TW 201426151 A	01-07-2014
		US 2014169722 A1	19-06-2014